

文章编号:1001-4810(2010)03-0325-06

城市屋顶雨水回灌裂隙岩溶含水层的国内外案例介绍 ——兼对济南市屋顶雨水回灌裂隙岩溶含水层问题的思考

王维平, 徐玉, 何茂强, 曹彬
(济南大学资源与环境学院, 山东 济南 250002)

摘要:通过监测和分析济南市市区降水、屋面雨水水质和径流过程,屋顶雨水属微污染类水,经前期雨水弃流和预处理达到一定质量标准后,通过管井回灌到裂隙岩溶含水层,可用于饮用水供水和保护地下水环境。已做的示踪试验表明,北方岩溶含水介质多属多重裂隙岩溶通道,因此在人工开采条件下,回灌应关注快、慢速流带来的不同水质变化问题,包括屋面雨水与裂隙岩溶介质的水岩作用。澳大利亚的案例说明,裂隙岩溶含水层对不同污染物有着不同的衰变效果。100多年来 Mount Gambier 市城区雨洪水经非承压石灰岩含水层径流一直排放到作为城市供水的蓝湖,到目前它对蓝湖水质没有表现出任何可量度的损害。但对于济南市的屋顶雨水回灌裂隙岩溶含水层,仍有许多问题需要研究。

关键词:屋顶雨水;裂隙岩溶水;含水层补给;山东济南

中图分类号:P641.25 **文献标识码:**A

0 引言

济南市以“泉城”闻名,裂隙岩溶水也作为重要的供水水源。城区一方面水资源短缺,另一方面洪涝灾害严重。随着城市化的进程,城市不透水面积的增大,改变了天然水文循环过程,为了防洪不得不将雨洪径流通过排水系统尽快排出,造成了水资源的浪费和碳汇的减少。房屋建设占城市建成区面积的67%~70%,屋顶为雨水的收集提供了天然集流场并且雨水水质相对较好,属微污染类水。济南市具有优越的回灌地质和地貌条件,裂隙岩溶含水层渗透系数大,岩溶地下水储存空间大,从南部的直接补给区到北部的泉水排泄区,地下水水力坡度大,为汛期雨水提供了快速入渗的调蓄库容。因此将微污染的屋顶雨水径流处理达到饮用水标准,回灌到裂隙岩溶含水层,用于饮用水供水和保护地下水环境,是解决济南市南部开发与保护矛盾的有效措施之一。国内外利用不同水源回灌岩溶含水层的成功案例,为本市的雨水回灌利用

提供了借鉴。

1 城市屋面雨水径流水质变化规律与评价及前期处理

研究屋面雨水径流污染物随时间和降雨强度的变化,对合理确定初期雨水弃流,回灌岩溶水具有关键的作用。研究发现城市屋面初期雨水污染都很严重,随着降雨时间的延长,污染物浓度逐渐减小,色度也逐渐降低^[1-3]。作者对2008年3月至8月的共7场降水过程在济南大学教工宿舍17号楼产生的屋面径流取样35个,然后送山东省分析测试中心进行化验。检测项目有pH、COD、NH₃-N、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、P、SO₄²⁻、Cl⁻、F⁻、Fe、Mn、Hg、Cu、Ni、总硬度、悬浮物、可溶性固体总量、As、Pb、Cr⁶⁺、Cd、Zn、色度、浊度、挥发酚、氰化物、总有机碳。结果显示:(1)屋顶雨水污染物随降雨历时发生变化。以浊度为例,浊度总的变化趋势是随着降雨历时的增加逐渐减少,但是

基金项目:国家自然科学基金项目(40972169)“城市屋面雨水处理后回灌裂隙岩溶含水层实验研究”、山东省自然科学基金项目(Y2008E18)“城市屋顶雨水渗井回灌岩溶水试验研究”

第一作者简介:王维平(1961-),男,博士,教授,主要研究方向:含水层补给管理。E-mail: stu.wangwp@ujn.edu.cn.

收稿日期:2010-06-17

过程呈波浪式变动,局部有升高的。(2)屋面雨水径流污染物的浓度不仅与降水历时有关,而且还受降雨强度大小的影响。在一次降雨过程中,屋面雨水径流污染物浓度是随着降雨强度的增加而增大,但这种变化主要发生在次降雨的前期,到后期雨强再大,屋面雨水污染物浓度不但不会增加反而减少。(3)屋面雨水径流污染物在年内各次降雨变化很大。年内春季到夏季浊度呈降低趋势,夏季浊度较小,甚至达到非常理想的水质状态。春季第一场降雨屋面雨水径流中的超标污染物多,氨氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、硫酸盐、氟化物、铅、锌、挥发酚、色度、悬浮物均超过地下水质量标准Ⅲ类水。污染物主要来自屋顶的降尘和空气中携带污染物,其中屋顶的降尘占的比例最大。年内各次初期屋顶雨水径流超标的组分有:氨氮、亚硝酸盐氮、悬浮物、铅、色度、浊度、挥发酚。由于初期屋面径流雨水水质很差,因此若利用屋面雨水进行回灌,必须要进行初期弃流。分析计算结果表明,前期弃流量应大于3mm。

前期弃流量的大小与预处理设施成本、屋面雨水径流的利用率有关。弃流后的雨水在回灌前需进行预处理,使各污染物浓度达到饮用水标准后再进行回灌。岩溶含水层雨水回灌利用中最重要的问题是雨水水质问题。屋面雨水的处理方法可分为物化处理、生化处理、生态处理和膜过滤法。综合考虑降水历时、裂隙岩溶含水层的特点、弃流后屋面径流水质、预处理后达到的水质及预处理设施的成本,预处理设施应充分利用屋顶雨水的势能,岩溶含水层渗透系数大,弃流后雨水水质相对较好的特点进行设计。但2008年砂滤试验表明,降水本身氮化合物仍然超标,因此必须对其进行专门处理,具体方案有待进一步研究。

总之,屋面雨水回灌补给裂隙岩溶含水层后作为饮用水供水,在回灌前需进行深度处理,以保护人类健康和环境,这是可管理含水层补给(MAR)的方针与原则^[4]。

2 裂隙岩溶含水层的特征

尽管裂隙岩溶水由于自身的水动力特征以及补给、径流、排泄条件决定了其容易遭受污染的特点,但是济南市以及我国北方裂隙岩溶水往往是城市供水以及工农业生产的主要水源。北方裂隙岩溶水的含水介质多为溶隙网络-强径流带组合型,导水系数大,非均质性和各向异性强烈;水源地的地下水实际平均流速大、给水度和储水系数小;在露头区降水通过溶沟、溶槽直接入渗,汛期河流漏失,第四系覆盖层越流补

给^[5]。岩溶地区裂隙和岩溶发育总是不均匀的,有大的连通裂隙和通道,也有微小的裂隙和溶穴,大的裂隙和溶洞所占的总体积一般比较小,大量的是细微裂隙和溶穴,即双重介质排水模型^[6]。地下水排泄对降水量既敏感又滞后。这种现象说明该区补给区范围大,水流到排泄区的时间不同外,还因为同时存在快速流(管道流)和慢速流(裂隙流)两种水流。快速流,导水性好而储水量小;慢速流,导水性差而储水量大^[7]。回灌水在裂隙岩溶含水层中的运动也可能出现这种特性,即少量的回灌水,迅速流到下游排泄区,而大量的回灌水则是通过溶隙网络相对缓慢地流向排泄区。碳酸盐岩含水层的矿物成分主要是方解石(CaCO_3)或白云石($\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$),其次是 SiO_2 , FeO_3 , Al_2O_3 以及粘土物质,回灌水对方解石和白云石的溶解和沉淀将产生一定的影响。

屋面雨水径流组分在不同类型的裂隙岩溶含水层的停留时间,直接影响到某些物质的衰减效果,尽管人们宏观上认为裂隙岩溶含水层渗透系数大,对污染物没有衰减能力,但不同地区和同一地区不同地点,含水介质的大小和连通性差异性很大,导致污染物的迁移和衰减不同。因此,结合勘探资料和示踪试验来掌握含水层的特征,对回灌地点的选择和取得好的回灌效非常重要。济南^[8,9]淄博^[6]示踪试验表明,人工开采岩溶水导致实际平均流速大,污染物的运移具有对流占绝对优势的特点。这些成果为屋顶雨水回灌岩溶含水层停留时间提供了一定的参考价值,但对具体回灌点由于含水层特征不同,快速流和慢速流各占的比例不同,还需作进一步示踪试验。从污染控制的角度考虑,快速流比例小的含水层,应是回灌中优先考虑的层位。

3 裂隙岩溶含水层回灌案例介绍

目前国内外均有利用不同水源回灌裂隙岩溶含水层作为不同用途的工程。上海市利用自来水回灌裂隙岩溶含水层储能成功实施了多年。自1965年,上海市在上棉21厂和上海化工研究院利用自来水进行了石灰岩中的管井回灌(冬灌夏用)。上海地区的石灰岩埋藏于覆盖层下,有两个裂隙岩溶含水层,分别厚60m和468m,属承压水,水质好,水温高,富水性中等。上棉21厂两眼石灰岩裂隙岩溶含水层井,冬灌夏用。夏用时抽出的水,水中总矿化度、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 Na^+ 、 K^+ 、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 NH_4^+ 的含量虽然比冬灌水高,但都低于岩溶水的原含量;总硬度、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等因冬灌水水中的含量较岩溶水高,所以夏用水

中的含量比岩溶水的高,但较冬灌水的低。夏用水的水化学类型较稳定,开始为HCO₃-Cl-Na-Ca型水,但当夏用水达到冬灌水量的一半后(57%),水类型又恢复到原来岩溶水的HCO₃-Cl-Na。从上海地区在石灰岩中进行人工回灌的情况来看,对增加地下水资源来说是很好的办法^[10]。

澳大利亚对不同种类的水回灌裂隙岩溶含水层用于不同目的包括用于饮用水进行了大量的试验研究。澳大利亚Mount Gambier市城市雨洪水通过市区500多眼排水井补给到非承压石灰岩含水层,最终排泄到该市饮用水的供水水源——蓝湖。该含水层厚100m,从下到上交替分布石灰岩、泥灰岩和下覆的白云质灰岩层,该市的大部分的雨洪水通过低于地面40m的白云质灰岩层径流并排泄到距200m以远的

蓝湖中(图1^[11])。含水层的导水系数为200~10 000m²/d,孔隙率在30%~50%之间变化^[11]。市区内有大约500个岩溶落水洞即排水井,这些井大部分都完全位于白云质灰岩含水层中,地下水年补给量500~650万m³,占蓝湖总补给量的35%~55%^[12]。城市雨洪水增加了含水层的补给量,同时也增加了各种污染物,如营养物、金属、BTEX、PAHs、农药、工业化学品。Joanne Vanderzalm检测了城市雨洪水中24项污染物(悬浮物、总磷、活性磷、氨、总铝、溶解铝、总砷、溶解砷、总镉、溶解镉、总铬、溶解铬、总铜、溶解铜、总铁、溶解铁、铅、溶解铅、总镍、溶解镍、总锌、溶解锌、总有机碳、溶解碳)以及微量有机化合物、少量挥发性有机物,如苯、甲苯、乙苯、二甲苯、多环芳烃,并在小区路面径流发现了茈萸、菲、分核及芴,进行了

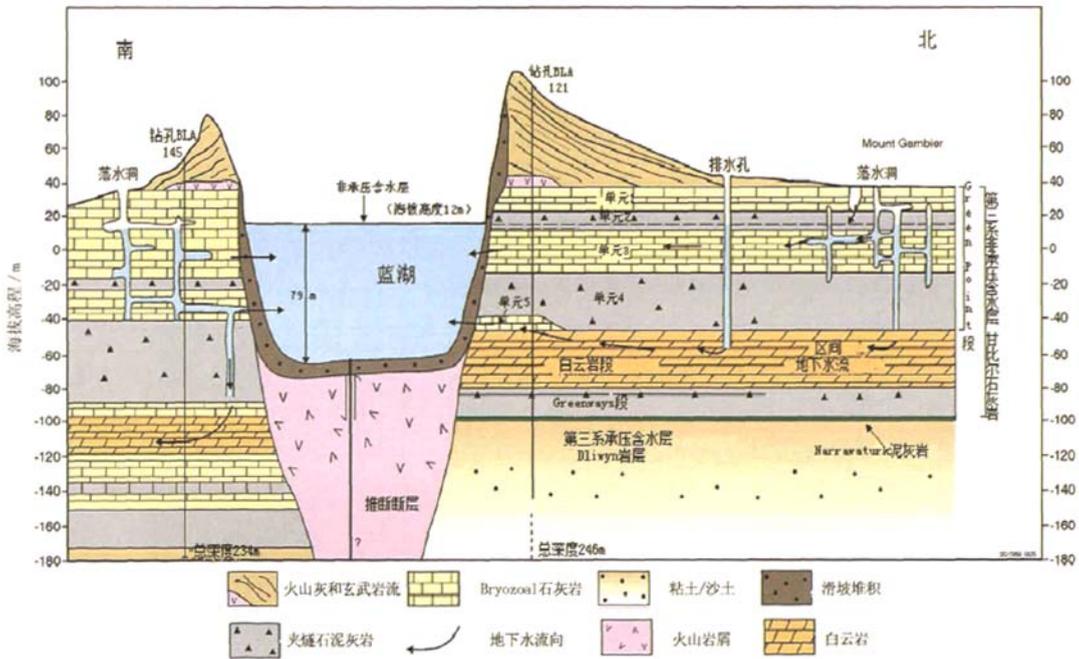


图1 澳大利亚蓝湖雨洪水回灌地质剖面图

Fig. 1 Recent stratigraphic assessment in the vicinity of the Blue Lake(Hill and Lawson)

含水层补给的风险评价。她采用计算、地球化学的结果标示器、野外示踪剂(SF6)三种方法,确定污染物在裂隙含水层的停留时间为500~18 000d,参照微量污染物在潜水含水层降解半衰期的运移时间,并通过检验蓝湖的24项水质指标,均满足饮用水标准,表明石灰岩含水层对城市雨洪水污染物具有一定的自然衰减作用,过去100多年的雨洪水径流排放,到目前对蓝湖水水质没有表现出任何可量度的损害^[13]。

Joanne等通过检测该城市雨洪水、地下水和湖水水质,分析了潜在污染物在含水层的衰减机制,包括生物、沉淀和吸附以及蓝湖可能的的光解和挥发。如对氨,在有氧条件下,氧化变成硝酸盐,在潜水石灰岩含水层降解的可能性很小^[14]。城区雨水中总金属的浓度超过水质标准,但是以离子状态存在的金属化合物的迁移能力很低。如铅,蓝湖的铅的浓度0.001mg/L,城市雨洪水中铅经常高于饮用水水质标准0.01mg/l,说明大部分铅被含水层有效去除;同样对可溶性铅,

衰减效果显著;城市雨洪水中可溶铝、锌、铬对生态健康有高的风险,但还不至于威胁到人类健康;蓝湖水中铬的平均浓度 0.005mg/L 和城市雨洪水中检测的大体相当,表明该石灰岩含水层对低浓度铬的衰减能力相当弱;锌在石灰岩含水层是不迁移的^[15],但是该区地下水和城市雨洪水中的可溶锌浓度相当,然而蓝湖水中的锌浓度却很低,表明石灰岩含水层对锌的衰减效果作用明显;含水层和蓝湖中的可溶有机碳,远低于最大允许值,表明在含水层中已去除了大部分的有机碳,很可能是通过有氧呼吸和脱氮作用被矿化。另外 Joanne Vanderzalm 还对微量有机物多环芳烃(单环、多环、卤代苯酚)和脂类潜在降解机制进行了分析^[13]。Mount Gambier 是城市雨洪水补给裂隙岩溶含水层作为城市饮用水的典型例子,现在还继续进行示踪剂 SF₆ 的监测及蓝湖底泥沉积物和人工合成有机化合物的监测。对研究裂隙岩溶含水层对不同营养物质、金属、有机化合物的衰减机理,有所借鉴。同济南利用雨水回灌裂隙岩溶水条件不同的是,蓝湖作为湖泊本身对污染物还有稀释、降解和泥沙吸附沉淀的作用。澳大利亚 Peter Dillon 等人采用 ASR(含水层储存开采 Aquifer Recharge Recovery)技术以独立居住房屋顶雨水回灌承压咸水石灰岩含水层用于非饮用水^[16]。澳大利亚的 Paul Pavelic 等人采用 ASR 技术以处理后的城市污水回灌承压咸水石灰岩含水层,进行了4年有关堵塞率与回灌水质关系的试验研究,认为可接受的最低短期和长期堵塞率要求是回灌水质浊度 $<3\text{NTU}$,总氮 $<10\text{mg/L}$ 和 $\text{pH}<7.2$ ^[17]。澳大利亚 CSIRO 在 Parafield Gardens 进行了城市雨洪水回灌咸水石灰岩含水层用水、饮用水的示范试验^[18],城市雨洪水收集后,进沉淀池、经芦苇池过滤,利用 ASR 和 ASTR(含水层储存运移开采 Aquifer Recharge Transfer Recovery)技术回灌到咸水石灰岩含水层,停留12个月,开采并处理用作供应饮用瓶装水。CSIRO 下一步准备进行的是既能为公众接受又能安全用作自来水的可持续的水质示范试验^[19]。在第七届国际水协再生水与回用会议期间,与会的许多专家饮用了标为补给回用雨洪水的瓶装水。Andrew L 等人对 ASR 用雨水回灌咸水石灰岩含水层的地球化学过程进行了5年的试验研究,认为长期影响 ASR 变化的关键因素是两种不同的水之间矿物溶解作用以及对水质和含水层稳定性的影响。在回灌井周围25m内水质的主要影响是碳酸盐溶解和硫化矿的氧化物,每次回灌后,每立方含水层溶解 $(35\pm 6)\text{g}$ 的 CaCO_3 、 $(50\pm 10)\text{g}$ 的 FeS_2 ;每次回灌期间,溶解了的碳酸盐含水层总量小于 0.005% ,硫的总减少量为 0.2% 。每

次回灌后立即检测发现,含水层中大量的 CO_2 是与回灌水中所带的有机物的氧化产生的^[20]。回灌对水质和含水介质的影响,需长期监测和深入研究。

近年来,地热回灌和开采井技术在国内发展很快,推动了如何将使用后的地热水回灌到裂隙岩溶热储层,保持热储压力,提高地热资源的利用效率的研究。在北京小汤山地区,天津蓟县系基岩岩溶裂隙型热储层(埋深 $910\sim 3190\text{m}$)进行了地热水的回灌试验,包括回灌压力、回灌量、回灌引起的热储压力、温度、水质的变化。从试验结果看,回灌是可行的^[21]。深层裂隙岩溶含水层的地热回灌的成功经验对浅层和中深层裂隙岩溶含水层屋面雨水回灌有许多可借鉴的地方。

4 济南市屋顶雨水回灌裂隙岩溶含水层有待研究的几个问题

济南市泉域裂隙岩溶含水层具有地下库容大、补给区水力坡度大、补给更新快,水质好的特点。直接通过管井,利用屋面雨水回灌岩溶水,既有其它类型含水层不可比拟的优势,也有地下水防污性能差的弱点,回灌水水质一旦超标直接进入裂隙岩溶含水层将给地下水环境带来负面影响。因此,回灌水水质控制至关重要。其次屋面雨水通过管井直接进入岩溶含水层补给岩溶水,同自然状态下降水通过裸露岩溶或第四系覆盖层下渗补给岩溶水不同,水岩相互作用也有所差别。有待研究的几个问题如下:

- (1) 屋面雨水径流水质变化规律及污染物的识别;
- (2) 屋面雨水的前期弃流装置和预处理措施;
- (3) 屋面雨水中不同污染物在裂隙岩溶含水层介质中的运移机理;
- (4) 屋面雨水通过管井回灌裂隙岩溶含水层时对地下水水质、水位和含水层介质的影响;
- (5) 屋面雨水通过管井回灌裂隙岩溶含水层总量的确定和对泉域水质影响分析

济南市南高北低,从东到西有12条主要泄洪沟系。这些沟道除雨季外为干谷,由于城市建设开发在排水工程上投入不足,现在已成为接纳流域部分污水的主要排污沟。有些沟道在直接补给区内是强渗带,常年排泄污水并部分补给岩溶地下水。监测表明,泄洪沟两侧岩溶地下水中硝酸盐超标,由于检测污染物项目有限,河道排污渗漏对泉水的影响程度和范围需进一步研究。石油类(炼油厂下游)和重金属 Cr^{6+} (电镀厂下游)在局部区域污染较重。结合澳大利亚的

研究结果和济南市水质监测值,可以认为氨氮、石油类和 Cr^{6+} 在裂隙岩溶含水层中基本不衰减,回灌中将构成主要风险源。另外上世纪90年代以来经济的快速发展,致使岩溶水类型出现局部变化。

地下水水质是水与含水岩层长期作用的结果,回灌水迅速而集中的进入含水层,急剧的改变平衡状态,是产生溶解和沉淀的主要因素,并导致混合水的饮用质量变化。因此,对回灌水与裂隙含水层和地下水相互作用的后果需作出预报和分析。另外,屋顶雨水处理后直接回灌岩溶含水层,仅仅接触了大气中的 CO_2 ,同经过土壤和渗流带再补充到潜水相比,没有充足的机会溶解土壤中 CO_2 , CO_2 浓度低,溶解岩溶含水层的 CaCO_3 少,减少了碳酸盐胶体沉淀的物质来源。当然屋顶雨水同正常降水入渗补给一样也存在低 Mg/Ca 比和低盐度有利于方解石的沉淀。刘再华等人试验发现南方岩溶裂隙水在洪水期间pH值降低,电导率升高,而岩溶管道水,pH值升高,电导率降低的现象。推断出有两个关键过程控制着洪水的水化学变化,一个是雨水的稀释,另一个是水-岩-气的相互作用^[22]。处理后的屋顶雨水通过管井回灌裂隙岩溶水,也存在雨水稀释和水岩气相互共同作用过程,但前者占优势,因为水中缺少高的 CO_2 浓度。影响水岩作用的因素除了回灌水中 CO_2 分压外,还有回灌水量。屋顶雨水回灌岩溶裂隙水,总水量有限,对一个点或区域,石灰岩的溶解和沉淀能力是一定的,反过来对回灌水总量的确定是有帮助。

在示踪试验和处理后屋顶雨水回灌裂隙岩溶层对水质影响的监测和分析基础上,利用数学模型来研究回灌后的不同雨水组分在裂隙岩溶介质的运移规律,可指导回灌工程。郭飞等^[23],朱学愚等^[24]等认为北方裂隙岩溶含水层与孔隙含水层以及典型的岩溶含水层都有所不同,对流占绝对优势。因此,对裂隙岩溶水的水头和污染物运移可以用等价多孔介质模型(MODFLOW和MT3D)来进行数值模拟,但要考虑北方裂隙岩溶的特点。澳大利亚 Pavelic, P 利用 FEFLOW 软件和半解析方法,进行了数值模拟,初步确定利用城市雨洪水回灌石灰岩含水层的回灌井和开采井的位置和距离(75~100m)^[25]。屋顶雨水经前期雨水弃流和预处理达到饮用水回灌裂隙岩溶水,长期影响回灌的关键因素是两种不同的水之间矿物溶解作用以及对水质和含水层稳定性的影响^[22]。最后是各种风险可能带来对水质的影响,例如酸雨、各种突发性大气污染等,造成对屋顶雨水预处理措施负荷的冲击,需进行风险措施控制。

5 结论

综上所述,屋顶雨水前期污染物浓度较高,后期雨水水质较稳定,属微污染水。前期雨水经弃流,再通过预处理设施处理,水质可达到地下水质量III类水。利用不同类型的水源(包括城市雨洪水)回灌裂隙岩溶层用于不同目的(包括饮用水)是可行的,有成功的例子。澳大利亚和国内都进行过有关回灌水对水位、水质、碳酸盐岩的环境影响的试验以及示踪试验,特别是澳大利亚在对城市雨洪水中的主要污染物在石灰岩含水层运移中的衰减监测结果,为济南利用处理后的屋顶雨水达到饮用水标准回灌裂隙岩溶含水层试验提供了参考依据。屋面雨水通过管井回灌裂隙岩溶含水层同自然降水入渗补给岩溶水差别很大,仍然有许多问题需要进一步的研究。

参考文献

- [1] 曹秀芹,车武.城市屋面雨水收集利用系统方案设计分析[J].给水排水,2002,28,(1):13-15.
- [2] 车武,汪慧珍,任超.北京城区屋面雨水污染及利用研究[J].中国给水排水,2001,17(6):57-61.
- [3] 黄群贤,刘红梅,李海燕,等.石家庄市多年降水分析及雨水利用研究[J].河北科技大学学报,2006,27(4):332-336.
- [4] Wang Weiping, Peter Dillon, Joanne Vanderzalm. 中国一澳大利亚含水层补给管理新进展[M]. 郑州:黄河水利出版社,2009,85.
- [5] 刘建立,朱学愚,钱孝星.中国北方裂隙岩溶水资源开发和保护中若干问题的研究[J].地质学报,2000,74(4):343-352.
- [6] 朱学愚,徐绍辉,司进峰.示踪试验在淄博裂隙岩溶水污染治理中的应用[J].中国岩溶,1997,1(2):131-137.
- [7] 钱家忠,王家权.中国北方裂隙岩溶水模拟及水环境质量评价[M].合肥:合肥工业大学出版社,2003:24.
- [8] 山东省地质矿产局801水文地质工程地质大队.济南泉域西部岩溶水系统水利联系研究报告[R].1992.
- [9] 张乃兴,黄春海.济南四大泉群水源地连通试验研究[J].山东师大学报(自然科学版),1998,1(4):408-412.
- [10] 上海市水文地质大队.地下水人工回灌[M].北京:地质出版社,1977:164-165.
- [11] Joanne Vanderzalm, Peter Dillon, Steve Marvanek, et al. Over 100 years of drinking stormwater treated through MAR; assessing the risks of stormwater recharge on the quality of the Blue Lake [C]. Proceedings of ISMAR6, 2006:616-625.
- [12] Turner, J. V., Allison, et al. The water balance of a small lake using stable isotopes and tritium [J]. Journal of Hydrology, 2005, 79:199-220.
- [13] Joanne Vanderzalm, Tara Schiller, et al. Impact of stormwater recharge on Blue Lake Mount Gambier's drinking water [C]//中国北方地下水可持续管理. 郑州:黄河水利出版社,2008:22-27.
- [14] Lamontagne, S. And Herczeg, A.. Predicted trends for NO_3^-

- concentrations in Blue Lake, South Australia[R]. CSIRO Land and Water, May 2002;225—229.
- [15] Vanderzalm, J. L.. Hydrogeochemical processes during Aquifer Storage and Recharge(ASR) with reclaimed water in a carbonate aquifer[D]. PhD thesis, Flinders University, 2004;56—57.
- [16] Peter Dillon, Karen Barry. Domestic Scale Rainwater ASR Demonstration project status report July2003-June2005 [R]. Progress report No. 2, 2005;13—14.
- [17] Paul Pavelic, Peter J. Dillon, Karen E. Barry et al. Water Quality effects on clogging rates during reclaimed water ASR in a carbonate aquifer[J]. Journal of Hydrology, 2007, 334:1—16.
- [18] Rinck-Pfeiffer, Colin Pitman and Peter Dillon. Stormwater ASR and ASTR (Aquifer Storage Transfer and Recovery) under investigation in Salisbury, South Australia [C]. Proceedings of ISMAR2005, Beron, 2005; 151—159.
- [19] Peter Dillon. Progress with managed aquifer recharge in Australia [C]. Proceedings of International Symposium of Effective Groundwater Management, Feb. 15—19, 2009, Bangkok;115—119.
- [20] Andrew L. Herczeg, Karen J. Rattray, Peter J. Dillon, et al. Geochemical processes during five years of aquifer storage recovery[J]. Ground Water, 2004, 42(3):438—445.
- [21] 刘久荣. 地热回灌的发展现状[J]. 水文地质工程地质, 2003, (3):100—104.
- [22] 刘再华, Chris GROVES, 袁道先, 等. 水-岩-气相互作用引起的水化学动态变化研究——以桂林岩溶试验场为例[J]. 水文地质工程地质, 2003(4):13—17.
- [23] 郭飞, 朱学愚, 刘建生, 等. 山东淄博裂隙岩溶水中污染物运移的数值计算及治污措施, 水利学报, 2007 (7):57—63.
- [24] 朱学愚, 刘建生. 山东淄博市大悟水源地裂隙岩溶水中污染物运移的数值研究[J]. 地学前缘, 2003, 8(1):171—177.
- [25] Pavelic, P., Dillon P. And Robinson, N. Modelling of Well-Field Design and Operation for an Aquifer Storage Transfer and Recovery(ASTR) Trial. Pro IAH XXXI Congress: "New Approaches to Charactering Groundwater Flow"[C]. Swets & Zeitlinger Lisse, 2005; 859—862.

Cases of fracture karst aquifer recharge with urban roofwater at home and abroad —Reflection on the relevant issues in Jinan City

WANG Wei-ping, XU Yu, HE Mao-qiang, CAO Bin

(School of Resources and Environment, University of Jinan, Jinan, Shandong 250002, China)

Abstract: Through monitoring and analyzing the water quality and quantity of the precipitation and rainwater fallen on the roof in Jinan City, it is found that the rainwater fallen on the roof being slight contaminated water; and that after removal the initial rainwater and pre-treatment the water on the roof can reach certain standard to recharge fracture aquifer, which can be used for drinking water and protection of groundwater environments. The former trace tests prove that most karst aquifer medium in north China is multiple fracture-channels, thus, the variation of water quality brought by fast and slow flow in recharge process, including the rock-water reaction between the karst fracture medium and the rainwater on the roof, should be paid attention in tificial recharge under the condition of artificial recharge. The case study in Australia illustrates that the karst fracture aquifer has different decay effects to different contaminants. Over 100 years, Mount Gambier reuses urban storm-water by discharging the water into an unconfined limestone aquifer that recharges the Blue Lake - the city's domestic water supply. But there is no any measurable detriment to the water quality in the Blue Lake to date. Of course, there are still many problems need to be studied in recharging karst fracture aquifer with rainwater fallen on the roof in Jinan.

Key words: rainwater fallen on the roof; karst fracture water; aquifer recharge; Jianan, Shandong